

ダム基礎処理工の透水性に関わる 三次元施工品質管理システムの開発

野中 隼人^{1*}・升元 一彦¹・中畷 誠門¹・佐藤 敏亮²・高橋 勝也³・奈須野 恭伸³

¹鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

²鹿島建設株式会社 土木管理本部 (〒107-8348 東京都港区赤坂六丁目5-11)

³鹿島建設株式会社 九州支店 大分川ダム建設JV工事事務所 (〒870-1201 大分県大分市廻栖野3039-2)

*E-mail: nonakaha@kajima.com

ダム基礎処理工の品質を確保する上で、基礎岩盤の透水性状に関する情報、特に、地下水の流動経路となる割れ目の分布、性状、連続性を把握し、施工データを踏まえた管理を行うことが重要である。ただし、それには多大な時間と労力を要することから、施工過程で得られる情報から岩盤透水性に関する情報を迅速に抽出し、簡易に評価・管理できるシステムの構築が必要である。

著者らは、孔壁撮影画像に着目し、割れ目情報を自動で抽出する解析技術、割れ目の連続性を定量的に評価する技術、および施工情報と統合し一元管理する三次元品質管理システムを開発した。また、現在稼働中の現場において開発技術の適用性を確認したので報告する。

Key Words : dam, foundation works, rock fracture, permeability, quality management system

1. はじめに

ダム基礎処理工の品質を確保する上で、基礎岩盤の透水性状に関する情報を把握し、施工データを踏まえた管理を行うことが重要である。近年、特に岩盤の透水性に関わる情報として、地下水の流動経路となる割れ目の分布、性状、さらにはその連続性を立体的に把握することの重要性が指摘されている¹⁾。ただし、これらの情報を得るためには、地質技術者による詳細な調査、整理、分析が必要であり、多大な時間と労力が掛かることから、これらをタイムリーに施工にフィードバックすることが困難であった。

また、基礎処理の施工過程では、施工計画図や地質縦断図、ルジオンマップなど、用途や対象に応じて様々な図面が作成される。その他にも、コア写真や孔壁展開画像、基礎掘削面の割れ目スケッチなど、多様な調査データが離散的に取得される。施工計画や追加孔の必要性検討および改良効果を評価するためには、これらの膨大な情報から必要な情報を選定した上で総合的に評価する必要があるが、これらの情報を一元的に整理するには多大な労力と時間を要することから、簡易かつ迅速なシステムの開発が望まれていた。

これらの課題を踏まえ、我々は施工過程で得られる情報から、岩盤の透水性に関する情報を定量的に自動かつ

迅速に抽出し、それらを施工情報とともに一元管理する技術の開発を進めている。著者らは、基礎岩盤の透水性状に関する情報を取得できる孔壁展開画像に着目した。

図-1に孔壁画像を用いた品質管理フローを示す。孔壁画像から情報を迅速に抽出し施工へフィードバックするために、「割れ目情報の自動抽出技術」、「割れ目情報に基づく連続性判定技術」、「施工データとの統合による基礎処理工の三次元施工品質管理システム」を開発した。本稿では、各技術の概要と、現在稼働中の現場への適用事例を報告する。

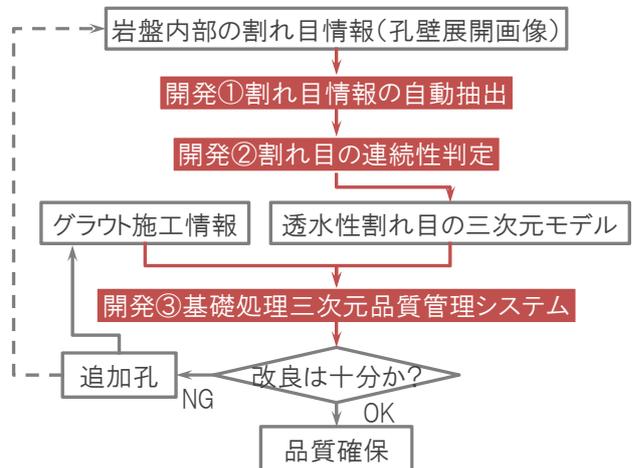


図-1 孔壁展開画像を用いた基礎処理工の品質管理フロー

2. 割れ目情報の自動抽出技術

(1) 地質情報の取得における孔壁展開画像の活用

ダムの基礎処理工では、基礎岩盤内部の地質状況を把握することが重要であるため、ボーリングコアの採取やポアホールカメラによる孔壁撮影が行われることが多い。これらは、地表から深部に至る連続的なデータを取得できる最も有効な調査手法である¹⁾。表-1に両者を用いた評価により得られる割れ目の要素とその精度を示す。孔壁撮影画像（孔壁展開画像）からは、コア観察ではしばしば評価が困難な割れ目に関する情報（走向・傾斜、開口量など）について、より高精度に取得できる。

また、孔壁展開画像は画像データであるため、孔壁の状況を画素（赤・青・緑の輝度値）の集合体として取得できる。そのため、視覚的な評価だけではなく、数値情報を用いた定量的評価も可能である。

そこで、本研究では施工過程で取得される孔壁展開画像に着目し、画像解析により自動で割れ目情報を抽出する技術を開発した。

表-1 コアと孔壁展開画像から得られる割れ目の要素と精度

割れ目の要素	ボーリングコア	孔壁展開画像
風化の程度	◎	○
割れ目性状（挟在物の有無）	◎	○
割れ目間隔（密度）	○	◎
割れ目形状	○	◎
開口量	×	◎
走向・傾斜	△	◎

(2) 孔壁展開画像を用いた割れ目属性情報の抽出方法

岩盤内部に分布する平面の割れ目がボーリング孔と交差している場合、その孔壁展開画像上では割れ目は正弦波形状として確認される。また、割れ目が開口している場合や、透水による有色鉱物の析出が生じている場合などには、画像上の割れ目交差部では周辺母岩と色（輝度値）が異なっている場合が多い。これらの特性を利用することで、割れ目のボーリング孔への交差位置を特定することができる。

解析方法の基本的な考え方は、走向・傾斜・深度で決まる正弦波について、その正弦波上の画素の輝度値を求め、周辺の母岩の平均輝度値との乖離が大きい（設定した輝度値差閾値より大きい）場合に割れ目が交差していると仮定して抽出を行うものである（図-2）。

ただし、割れ目は必ずしも綺麗な平面ではないため、展開画像上では割れ目が一部不明瞭であったり、正弦波からずれが生じる場合がある。そのため、余裕を持たせて抽出を行うために以下のことを実施した。

まず、設定した正弦波の上下領域に探索範囲を設定し、周辺領域との輝度値差の判定領域を拡大した。すなわち、

正弦波上の画素が閾値を超えていなくても、探索範囲内で一つでも閾値を超えていれば抽出対象となる。すなわち、割れ目が正弦波と一部ずれている場合にも抽出が可能となる。また、上記で閾値を超えたと判断された画素数（適合画素数）の円周方向の全画素数（ $1^\circ=1\text{pixel}$ の場合360pixel）に対する比率（適合比率）が、設定した閾値を超えていれば抽出できるように余裕を設けた。これにより、割れ目に不明瞭な部分があった場合にも抽出が可能となる。図-3に割れ目抽出の解析フローと概念図を示す。

図-3に示す方法によりボーリング孔に対する割れ目の交差深度を特定した後、各割れ目について、走向・傾斜、開口量、色情報を算定する。なお、開口量は円周方向の平均的な値であり、探索範囲内の全画素数に対する適合画素数を正弦波の円周方向の画素数で除して、深度方向の解析精度を乗じた値を傾斜で補正することにより算出する。また、色情報は、RGBの値を化学的風化程度の評価において適用実績のあるL*a*b*の表色系²⁾（明度L*、赤度a*、黄度b*）に変換することにより取得した。

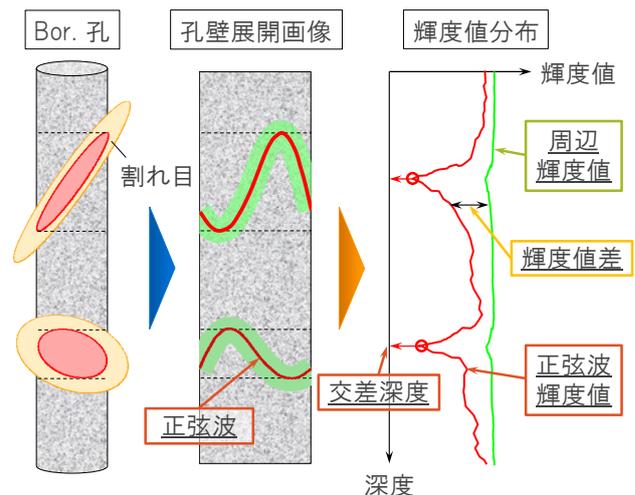


図-2 ボーリング孔に交差する割れ目の性質

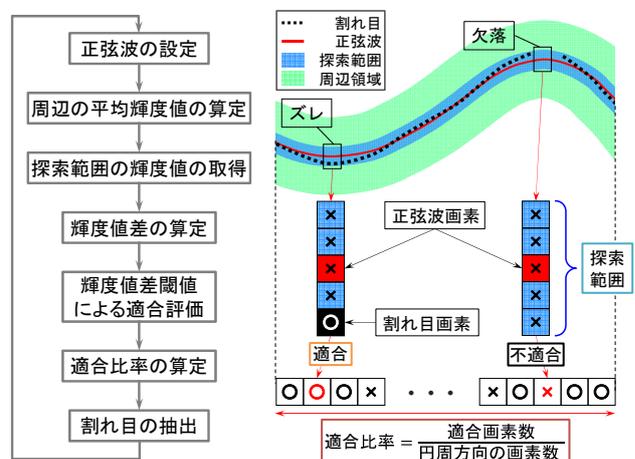


図-3 割れ目抽出の解析フローと概念図

3. 割れ目の連続性判定技術

(1) 割れ目の連続性評価における課題

岩盤の透水性に寄与する重要な要素として、割れ目の連続性が挙げられる。ダム基礎岩盤において、大きな割れ目が分布していた場合にはそれが主要な水みちとなる可能性がある。そのため、ボーリング孔間の割れ目の連続性を考慮した上で、改良不十分となりうる要注意箇所を評価し、配合や注入量を変更するなどの状況に応じた適切な処理を行う必要がある。

一方で、岩盤内部の割れ目に関する情報は基礎処理孔の位置に依存して離散的にしか取得できないため、限られた情報から割れ目の連続性を推定しなければならない。また、それぞれのボーリング孔で得られる割れ目は膨大かつ多様である。そのため、個々の割れ目性状を把握しつつ、隣接する割れ目との膨大な組合せについて相互関係を評価するには、多大な労力を必要とする。

上述の課題を踏まえ、著者らは、2 (2) で得られる割れ目の属性情報を用いて、簡易かつ定量的に連続性を評価するプログラムを開発した。

(2) 割れ目の連続性判定方法

通常、割れ目の連続性は割れ目の位置や角度、透水性、挟在物などを総合的に考慮して評価される。2 (2) に示した割れ目属性情報の抽出技術により、割れ目の交差深度、走向・傾斜、開口量、色情報、交差深度におけるLu値を取得できるため、これらを用いて割れ目の連続性の判断材料となる指標を自動で算定し、その指標に基づき連続性の評価を行うこととした。

異なる2本のボーリングに交差する割れ目が同一の割れ目であるかを判定するための指標は、それぞれの割れ目を延長した際の相互の割れ目の乖離量を示す面間距離と交差角度とした (図-4)。これらの連続性判定指標を隣接孔の全割れ目との組合せに対して計算し、設定した指標の閾値と比較することで連続性を評価する。

工情報を三次元で可視化し、関連する情報とともに一元管理するシステムを開発した。これにより、人間が普段視覚的に認識している状況を再現できるため状況把握が容易になるとともに、必要な情報の収集作業を簡略化することができるため業務を効率化できる。

開発したシステムの具体的な機能は、三次元モデルの統合、グラウト管理日報データに基づく三次元ルジオンマップの作成、ボーリング孔・試験区間ごとの施工関連資料のリンクである。図-5に品質管理システム概念図を、図-6にグラウト施工記録の三次元表示方法を示す。

なお、均質等方な弾性媒体中に発生するせん断割れ目は円盤形状を呈することが知られている³⁾ため、岩盤内の割れ目の形状を円盤と仮定してモデル化を行った。

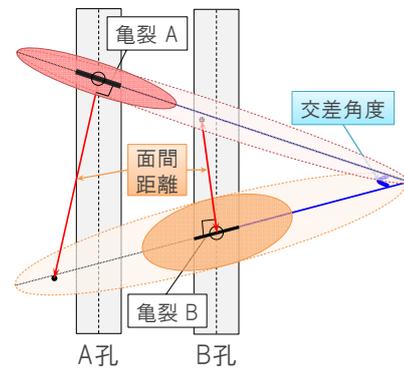


図-4 連続性判定指標の概念図

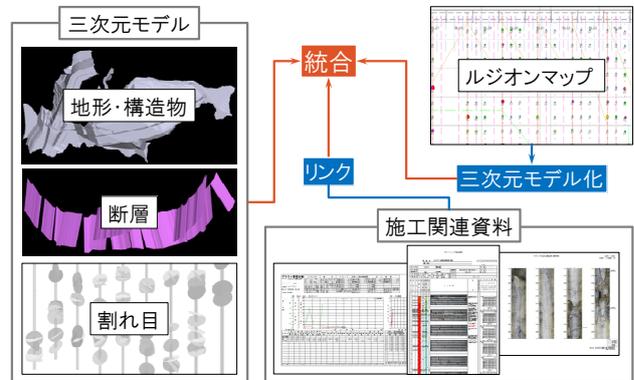


図-5 三次元施工品質管理システムの概念図

4. 三次元施工品質管理システム

従来の施工管理では、すべての情報は二次元の図面として表現されてきた。例えば、ダムの基礎処理ではグラウトの施工データは二次元のルジオンマップとして整理されることが多い。しかしながら、現場経験が浅い技術者にとって、二次元の図面から実際の立体的な状況を正確に把握することは容易ではない。特に、関連する情報が多い場合にはそれらすべての関係を的確に把握し、活用することは極めて困難となる。

そこで、地盤情報の可視化ソフトを用いて、複数の施



図-6 グラウト施工記録の三次元表示方法

5. 適用事例

(1) 適用現場概要

本開発技術を大分川水系七瀬川に建設中の大分川ダム（図-7、堤体積：約3,870,000m³、堤高：91.6m、総貯水容量：約24,000,000m³、中央コア型ロックフィルダム）に適用した。基礎処理の対象となる岩盤は主として荷尾杵（におき）花崗岩であり、5Lu以下の難透水岩盤を主体とする。

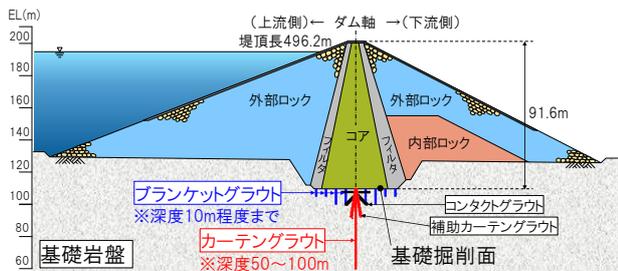


図-7 大分川ダム現場概要図

(2) 適用結果

a) 割れ目自動抽出技術の適用結果

割れ目情報の自動抽出技術を孔壁展開画像が撮影されたカーテングラウトのパイロット孔に対して適用した。図-8に解析結果例を示す。正弦波から外れている割れ目や一部不明瞭な割れ目についても、走向・傾斜、開口量などの属性情報とともに高精度で抽出することができた。最終的に、パラメータを調整することで、孔壁画像観察およびコア観察から事前に評価した透水割れ目（施工担当評価結果⁴⁾）のうち53%を自動抽出することができた。

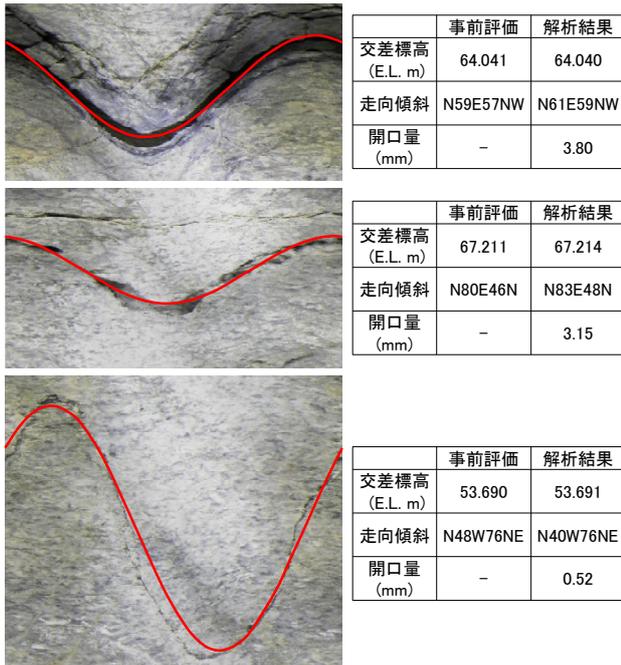


図-8 割れ目抽出の実施例

b) 割れ目の連続性判定技術の適用結果

本検討では、カーテングラウトのパイロット孔において事前に評価した233枚の透水割れ目（施工担当評価結果⁴⁾）に対して、連続性判定技術を適用した。ここでは、透水性の高い区間に交差する割れ目を対象とするため、Lu値が5Lu以上の区間に交差する割れ目を抽出し、連続性判定の閾値を面間距離5m以下、交差角度10°以下と設定して評価を行った。図-9に隣接孔の割れ目と連続すると判定された連結割れ目の三次元モデルを示す。ここで抽出した8組の割れ目ペアは、ボーリング孔間をまたがる水みちとなりうる要注意箇所と考えられる。次に、連結割れ目と判断された割れ目ペアの個々の性状を表-2に示す。割れ目ペアとなったそれぞれの割れ目性状が概ね一致することが確認されたが、一部で性状の異なる割れ目同士が連結する結果となった。より確からしい判定を行うためには、割れ目の幅や色情報なども考慮に入れた評価が必要であると考えられる。

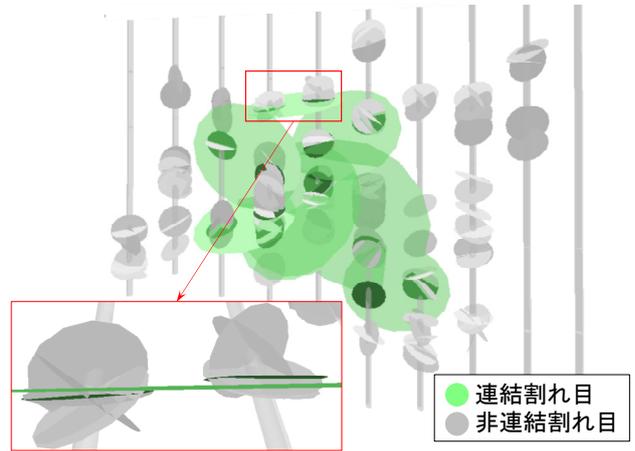


図-9 割れ目連続性判定の実施例

表-2 連結割れ目ペアの割れ目性状

連結割れ目	孔番号	走向・傾斜	割れ目性状
1	K35-P001	N76W61N	肌色系鉱物脈を伴う割れ目
	K36-P001	N72W65N	
2	K35-P001	N66W30S	褐色化した割れ目 方解石脈
	K36-P001	N78W28S	
3	K36-P001	N74W31S	肌色系鉱物脈を伴う割れ目
	K37-P001	N81W27S	
4	K36-P001	N68W78S	肌色系鉱物脈を伴う割れ目
	K37-P001	N64W70S	
5	K36-P001	N56W57SW	肌色系鉱物脈を伴う割れ目
	K37-P001	N52W61SW	
6	K37-P001	N64W63S	空隙（晶洞） 肌色系鉱物脈を伴う割れ目
	K38-P001	N73W65S	
7	K37-P001	N58W79N	肌色系鉱物脈を伴う割れ目 高角度割れ目
	K38-P001	N63W72N	
8	K38-P001	N80W73N	肌色系鉱物脈を伴う割れ目
	K39-P001	N77W74N	

c) 三次元品質管理システムの適用結果

大分川ダムに対して三次元品質管理システムを適用するにあたり、以下のことを実施した。

- ・ 地形データ、構造物図面の三次元モデル化
- ・ 基礎掘削面調査により得られた推定断層のモデル化
- ・ b) において評価した透水割れ目の三次元モデル化
- ・ グラウト日報に基づく三次元レジオンマップの作成
- ・ 各種三次元モデルの統合
- ・ 基礎処理関連資料のレジオンマップへのリンク付

評価例として、図-10にブランケットグラウトの施工データと推定断層（施工担当評価結果）とを統合したモデルを示し、図-11にカーテングラウトの施工データとb) において評価した割れ目を統合したモデルを示す。割れ目や断層の分布と基礎処理施工実績を重ね合わせることで、要注意地質の連続性を立体的に可視化することができた。また、図-12に示すように施工関連ファイルをリンク付することで、注入の過不足の評価や追加工の検討を対象箇所における施工情報や地質情報を踏まえて出来るようになった。

最終的に、抽出された透水割れ目の延長方向で透水性が改良されていること、高透水区間または異常注入区間が連続したままグラウトを終了している箇所はなく、過不足無い適切なグラウト注入を終えたことが視覚的に確認することができた。

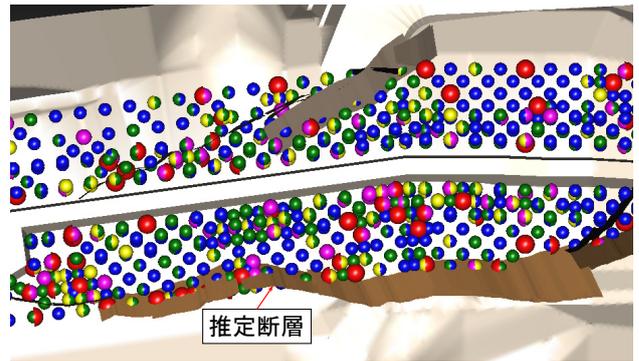


図-10 推定断層とブランケットグラウト施工データ

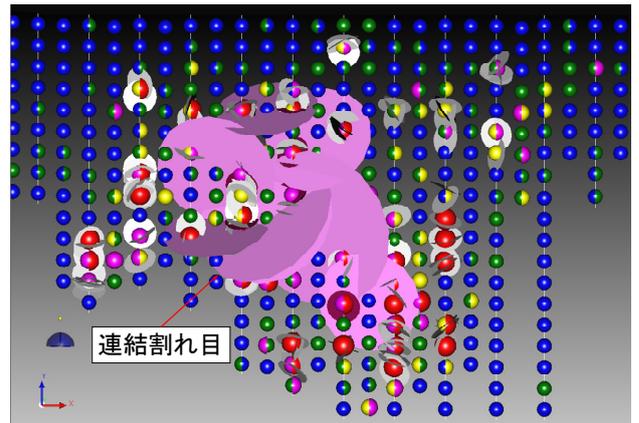


図-11 透水割れ目とカーテングラウト施工データ

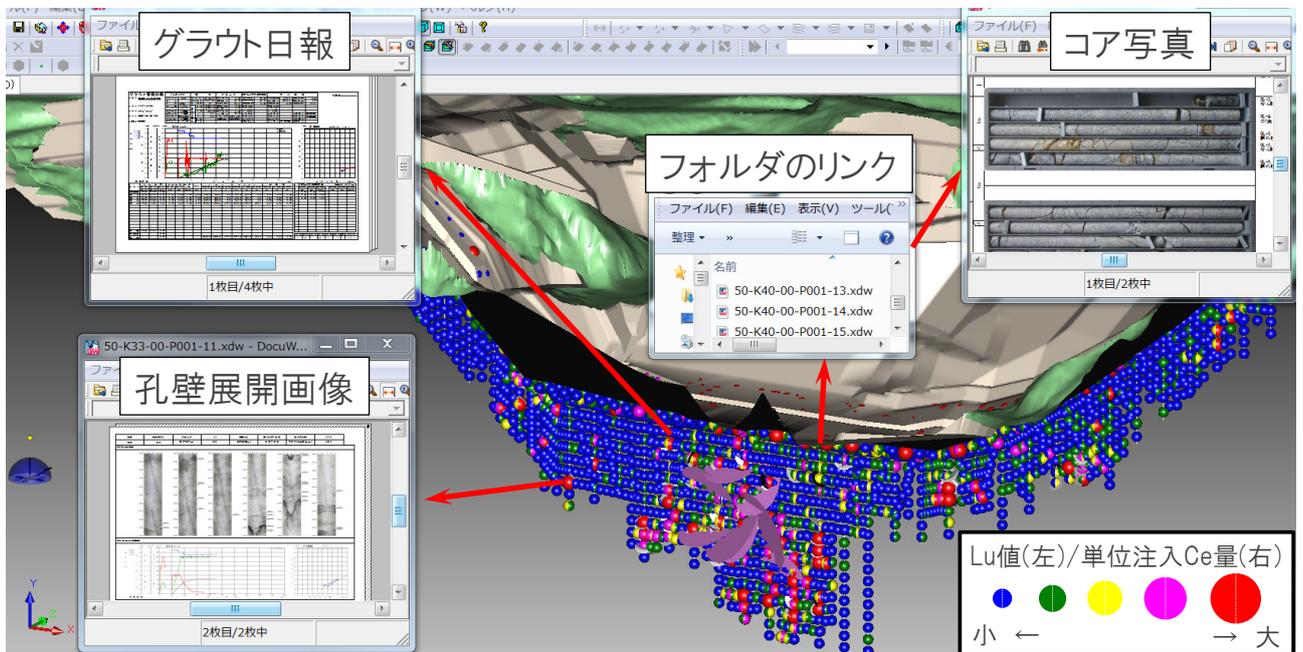


図-12 三次元品質管理システムによる評価例

6. まとめ

本開発では、孔壁撮影画像に着目し、基礎岩盤の透水性に関わる割れ目の抽出および割れ目の連続性の判定を行う技術を開発した。また、得られた割れ目情報を施工データと重ね合わせることで、施工品質に関わる情報を自動的に一元管理できる三次元品質管理システムを開発し、現在稼働中の現場において適用性を確認した。今後は、割れ目情報の抽出精度の向上の他、現場での利便性を考慮した入出力システムの改良、グラウト改良効果の定量評価技術の開発を行い、より迅速かつ定量的な品質管理・評価が可能なシステムの開発を進めていく。

参考文献

- 1) ダム基礎岩盤透水性研究会：ダム基礎における立体的岩盤透水性分布の把握手法，一般財団法人ダム技術センター，2013.
- 2) 戸邊勇人，宮嶋保幸，山本拓治，白松久茂，岩村武史：山岳トンネル切羽の風化変質判定システムの開発—切羽観察での適用例—，土木学会年次学術講演会講演概要集，VI-043，2014.
- 3) Scholz, C. H. : *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*, Cambridge University Press, New York, 1990.
- 4) 升元一彦，川端淳一，渥美博之，高橋勝也，奈須野恭伸，木村仁，高野仁：大分川ダム基礎処理工におけるパイロット孔の地質データを活用した注入管理，土木学会年次学術講演会講演概要集，VI-1057，2018

DEVELOPMENT OF A THREE-DIMENSIONAL QUALITY CONTROL SYSTEM RELATED TO PERMEABILITY IN A DAM FOUNDATION PROCESS

Hayato NONAKA, Kazuhiko MASUMOTO, Makoto NAKAJIMA, Toshiaki SATO, Katsuya TAKAHASHI and Yasunobu NASUNO

In order to ensure the quality of the dam foundation processing, it is important to grasp the permeability of the basic rock and to manage it based on construction data. However, since it requires a lot of time and labor, it is necessary to quickly extract information on rock permeability from the information obtained in the construction process and to construct a system for easy evaluation and management.

Focused on the image of borehole wall, we developed a technique to automatically extract fracture information, to quantitatively evaluate the continuity of fractures and a three-dimensional quality control system that integrates fracture information with the construction information.